

ارزیابی عدم قطعیت مدل های AOGCM-AR4 و مدل های هیدرولوژی در تخمین دما، بارش و رواناب حوضه قره سو تحت تأثیر تغییر اقلیم

علیرضا کمال^۱ * و علیرضا مساح بوانی^۲

چکیده

در شبیه سازی رواناب یک حوضه، به دلیل تغییر اقلیم، عدم قطعیت های مختلفی بر نتایج نهایی تأثیر می گذارند و با نادیده گرفتن هر یک از آنها از اعتبار نتایج کاسته می شود. همچنین در نظر نگرفتن عدم قطعیت های مرتبط با مباحث تغییر اقلیم در مطالعات، می تواند نتایج غیر واقعی و غیر کاربردی را به تصمیم گیرندگان تحمیل کند. در این تحقیق سعی شده است که تأثیر عدم قطعیت مربوط به مدل های شبیه سازی بارش-رواناب و مدل های AOGCM بر رواناب حوضه قره سو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ میلادی تحت سناریوی انتشار A2 از مجموع سناریوی SRES بررسی شود. در این راستا از ۹ مدل AOGCM-AR4 شامل CCSM3، CGCM3، CSIRO Mk3، GFDL CM2.1، GISS E-R، HadCM3، ECHAM5، MIROC-med، PCM و دو مدل مفهومی بارش-رواناب IHACRES و SIMHYD استفاده شد. ابتدا دو مدل بارش-رواناب برای دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ واسنجی و صحت یابی شد. سپس با کوچک کردن مقیاس داده های اقلیمی ۹ مدل منتخب AOGCM-AR4 برای منطقه مطالعاتی و معرفی آنها به مدل های بارش-رواناب، محدوده تغییرات دما، بارش و رواناب حوضه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ تحت سناریوی A2 مشخص شد. نتایج نشان می دهد که در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به مدل های AOGCM و مدل های هیدرولوژی باعث تعیین دقیق تر تغییرات رواناب در منطقه مطالعاتی می شود.

واژه های کلیدی: تغییر اقلیم، عدم قطعیت، SIMHYD، IHACRES، AOGCM.

ارجاع: کمال ع. و مساح بوانی ع. ۱۳۹۰. ارزیابی عدم قطعیت مدل های AOGCM-AR4 و مدل های هیدرولوژی در تخمین دما، بارش و رواناب حوضه قره سو تحت تأثیر تغییر اقلیم. مجله پژوهش آب ایران. ۵(۹): ۳۹-۵۰.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۲- استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: alireza.kamal@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۴/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۸/۰۴

مقدمه

تغییر اقلیم، حاصل از افزایش گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی و صنعتی شدن کشورهاست که منجر به افزایش دمای زمین می‌شود. گرمایش جهانی اثرات بارزی روی چرخه هیدرولوژی و سیستم‌های منابع آب دارد به گونه‌ای که می‌تواند بعنوان تهدیدی بزرگ بر سیستم‌های منابع آب در سراسر جهان قلمداد شود. این تهدیدات برای مناطق مختلف زمین متفاوت می‌باشند (پورکی ۲۰۰۷). در مطالعات تغییر اقلیم در تمامی مراحل مختلف شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی توسط مدل‌های AOGCM و همچنین تصحیح خروجی این مدل‌ها، منابع عدم قطعیت مختلفی وجود دارد. این منابع عدم قطعیت عبارتند از: عدم قطعیت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، عدم قطعیت در تبدیل میزان گازهای گلخانه‌ای به غلظت اتمسفریک و نیروی تابشی، عدم قطعیت مربوط به حساسیت مدل‌های AOGCM مختلف به نیروی تابشی یکسان، عدم قطعیت مربوط به شبیه‌سازی مدل‌های AOGCM در سطوح منطقه‌ای، عدم قطعیت در استفاده از روش‌های مختلف کوچک مقیاس کردن خروجی مدل‌های AOGCM و عدم قطعیت مربوط به مدل‌های هیدرولوژی که برای شبیه‌سازی‌های مربوط استفاده می‌شود. تاکنون محققان مختلف سعی در مدیریت هر یک از منابع عدم قطعیت در مطالعات تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب کرده‌اند. از جمله این تحقیقات می‌توان به مواردی که به عدم قطعیت مدل‌های AOGCM پرداخته‌اند، اشاره کرد. در بسیاری از تحقیقات به شاخصهای اقلیمی و هیدرولوژی حوضه آبریز پرداخته شده و روند تغییرات دما و بارش را با در نظر گرفتن تعداد حداکثری مدل‌های اقلیمی در آینده بررسی کرده‌اند (ماکزینو و همکاران، ۲۰۰۷؛ وانگ و لو، ۲۰۰۶؛ جاسون، ۲۰۰۸). هایهو و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای را با ۹ مدل AOGCM و سه سناریوهای انتشار A2، A1F1 و B1 مورد آزمایش قرار دادند. نتیجه این مطالعه در تغییرات توزیع فصلی دما و بارش، تأثیرات آنها روی رواناب و پارامترهای رطوبت خاک، جابجایی در مقدار گردش

جریان و توزیع آن در سراسر سال، اثر شدید خشکسالی و پوشش برفی و در نهایت تأثیرات شدید تغییرات دما بر روی زراعت نشان داده شد. در مطالعات جداگانه‌ای کریستین و لتنمایر (۲۰۰۶) و ماورر (۲۰۰۷) عدم قطعیت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب را با استفاده از خروجی‌های ۱۱ مدل AOGCM و شبیه‌سازی‌های مدل هیدرولوژی VIC در ایالت متحده انجام داده و نقش این عدم قطعیت را در شدت اثرات منابع آب نشان داده‌اند.

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژی در مطالعات تغییر اقلیم تنوع زیادی دارد (جیانگ، ۲۰۰۷). بنابراین بحث عدم قطعیت در نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نقش پررنگی خواهد داشت. تا کنون مطالعات اندکی در مورد تفاوت در شبیه‌سازی مدل‌های هیدرولوژی انجام شده است. بورمن و سفتون (۱۹۹۷) دامنه اختلاف در نتایج دو مدل هیدرولوژی مفهومی را بررسی کردند و نتایج نشان داد دو مدل قابلیت یکسانی در شبیه‌سازی جریان تاریخی دارند. همچنین در این تحقیق اشاره شده است که مطالعات بیشتری در مورد مقایسه اثرات اختلاف در نتایج مدل‌های هیدرولوژی می‌تواند راهبردی را برای کمک به مدیران و برنامه ریزان منابع آب فراهم آورد. جیانگ و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیقی اثرات بالقوه تغییر اقلیم را توسط شش مدل بیلان آب ماهانه با ۲۹ سال داده‌های ماهانه اقلیمی و رواناب بررسی کرد. نتایج آنالیزها نشان داد، هر شش مدل مفهومی قابلیت یکسانی در تولید مولفه‌های بیلان آب گذشته دارند و بیشترین اختلاف در نتایج مدل وقتی اتفاق می‌افتد که مدل‌ها در شبیه‌سازی اثر هیدرولوژی تغییرات اقلیمی استفاده شوند. در این تحقیق نشان داده شد که مقایسه و تعیین کمی اختلاف مدل‌های هیدرولوژی برای پیش بینی اثرات اقلیمی اهمیت ویژه‌ای برای مدیریت منابع آب یک حوضه، منطقه، قاره و حتی جهان می‌تواند داشته باشد.

با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان به اهمیت بحث عدم قطعیت در زمینه تغییر اقلیم پی برد. در بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه تغییر اقلیم یا منابع عدم

اقلیم متوسط باشد و بتوان تاثیر دو منبع عدم قطعیت را بصورت متعادل دید، انتخاب شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

زیرحوضه قره‌سو در شمال غربی حوضه کرخه و در غرب ایران واقع شده است. مساحت آن برابر ۵۳۵۴ کیلومترمربع بوده و حداکثر و حداقل ارتفاع آن به ترتیب ۳۳۴۶ و ۱۱۸۰ متر است. متوسط بارندگی سالیانه این حوضه بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است. در مطالعات تغییر اقلیم در ابتدا لازم است تا داده‌های دوره پایه مشخص شوند. در این تحقیق داده‌های پایه مورد استفاده شامل داده‌های مشاهداتی دما، بارش و رواناب در دوره ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ میلادی از ایستگاه‌های منتخب منطقه می‌باشد. برای متغیر دما داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه به عنوان مبنا انتخاب شد. برای متغیر بارش از میانگین منطقه ای داده‌های روزانه ۱۱ ایستگاه بارانسنجی استفاده شد. همچنین ایستگاه هیدرومتری قره‌باغستان واقع در خروجی حوضه قره‌سو به عنوان ایستگاه مبنا برای مشاهده تغییرات رواناب حوضه انتخاب گردید (جدول ۱).

قطعیت لحاظ نشده و یا هر کدام از این منابع به تنهایی مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه نادیده گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در مراحل مختلف ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم، باعث می‌شود تا از میزان قطعیت خروجی نهایی سیستم کاسته شود. از اینرو در این تحقیق تلاش شده است تا دو منبع عدم قطعیت مربوط به مدل‌های AOGCM و مدل‌های هیدرولوژی در تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر رواناب زیرحوضه قره‌سو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ میلادی تحت سناریوی انتشار SRES-A2 مقایسه و ارزیابی شد. به طور کلی در مطالعه اثرات تغییر اقلیم، وضعیت سه دوره ۳۰ ساله ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ بررسی می‌شوند. اولین دوره آینده نزدیک و آخرین دوره آینده دور می‌باشد. در آینده نزدیک هنوز انتشار گازهای گلخانه‌ای زیاد نیست، پس تغییر اقلیم هنوز شدید نمی‌باشد و در آینده دور تغییر اقلیم بسیار شدید است (ای پی سی سی، ۲۰۰۷). در اینجا بدلیل اثر گذاری مشهودتر گازهای گلخانه‌ای در دوره میانی ۲۰۶۹-۲۰۴۰ نسبت به دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و کارایی بیشتر در سیاست‌گذاری‌های مدیریت منابع آب این دوره نسبت به دوره ۲۰۹۰-۲۰۷۰، آینده میانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نتیجه این دوره به سبب این که اثرات تغییر

جدول ۱- نام و نوع ایستگاه‌ها در محدوده حوضه قره‌سو

ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
بوانه	بارانسنجی	۴۶-۵۸	۳۴-۵۲
بان سعید	بارانسنجی	۴۷-۰۷	۳۴-۵۶
دهستان	بارانسنجی	۴۷-۱۴	۳۴-۴۳
جلوگیره	بارانسنجی	۴۶-۵۱	۳۴-۳۵
کرمانشاه	بارانسنجی	۴۷-۰۹	۳۴-۲۱
هرسین	بارانسنجی	۴۷-۳۴	۳۴-۱۶
گوهرچغا	بارانسنجی	۴۷-۰۰	۳۴-۳۳
ماهیدشت	بارانسنجی	۴۶-۴۸	۳۴-۱۶
حسن آباد	بارانسنجی	۴۶-۳۹	۳۴-۱۰
دهراشه	بارانسنجی	۴۶-۲۲	۳۴-۴۱
روانسر	بارانسنجی	۴۶-۴۰	۳۴-۴۳
کرمانشاه	سینوپتیک	۴۷-۰۹	۳۴-۲۱
قره‌باغستان	هیدرومتری	۴۷-۱۵	۳۴-۱۴

مدل‌های اقلیمی و سناریو انتشار

در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های سه بعدی جفت شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو می‌باشد (ویلیبی و هریس، ۲۰۰۶؛ میشل، ۲۰۰۳؛ لن، ۱۹۹۹). مدل‌های AOGCM که در این تحقیق استفاده شده‌اند زیر مجموعه‌ای از چهارمین گزارش ارزیابی هستند که در سال ۲۰۰۷ منتشر شده است (IPCC(AR4) (جدول ۲). در این مطالعه برای شبیه‌سازی‌های آینده، (۲۰۴۰-۲۰۶۹) در هر ۹ مدل AOGCM از سناریوی انتشار A2 از مجموع سناریوهای SRES^۱ استفاده می‌شود. در این سناریو از رشد زیاد جمعیت و وابستگی کمتر به پیشرفت سریع اقتصادی با دیدگاه منطقه‌ای در جهت تعیین میزان گازهای گلخانه‌ای استفاده شده است. در این تحقیق بمنظور کوچک مقیاس کردن داده‌های مدل‌های AOGCM برای منطقه مورد مطالعه از روش تناسبی استفاده می‌شود. در این روش به طور معمول نسبت‌های ماهانه برای سری‌های تاریخی به دست می‌آید. ابتدا سناریوهای تغییر اقلیم برای دما و بارش تولید می‌شود. لذا برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل مقادیر "اختلاف" برای دما و "نسبت" برای بارندگی برای متوسط درازمدت هر ماه در دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و دوره شبیه‌سازی شده پایه توسط همان مدل (۲۰۰۰-۱۹۷۱) برای هر سلول از شبکه محاسباتی محاسبه می‌گردد (جونز و هولمن، ۱۹۹۶). سپس از روش عامل تغییر^۲ برای تولید سری زمانی سناریوهای اقلیمی استفاده می‌شود. در این روش، سناریوهای تغییر اقلیم به مقادیر مشاهداتی (در اینجا ۲۰۰۰-۱۹۷۱) افزوده می‌شود.

مدل هیدرولوژی

برای ارزیابی عدم قطعیت مربوط به مدل‌های هیدرولوژی در شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه قره‌سو تحت تأثیر عدم قطعیت‌های مدل‌های AOGCM، نیاز به تهیه مدل‌های بارش-رواناب با قابلیت انجام محاسبات در حجم زیاد می‌باشد. بدین منظور از دو مدل بارش -

رواناب IHACRES و SIMHYD در این تحقیق استفاده شد که در زیر به شرح مختصری از آن‌ها می‌پردازیم.

مدل بارش - رواناب IHACRES

مدل بارش رواناب IHACRES توسط جکمن و هورنبرگر (۱۹۹۳) ارائه شد. اساس این روش از دو مدول غیر خطی کاهش^۴ و مدول خطی هیدروگراف^۵ تشکیل می‌شود. به این منظور در ابتدا بارندگی r_k و دما t_k در هر گام زمانی k توسط مدول غیر خطی، به بارندگی موثر u_k تبدیل شده و سپس به وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود. (شکل ۱).

معادلات بکار رفته در مدول غیر خطی کاهش به منظور تبدیل بارش به بارندگی موثر در حوضه به کار رفته است.

$$u_k = s_k \times r_k \quad (1)$$

$$s_k = C \times r_k + \left(1 + \frac{1}{\tau_w(t_k)}\right) s_{k-1} \quad (2)$$

$$\tau_w(t_k) = \tau_w e^{0.062 f(R-t_k)} \quad (3)$$

$$\tau_w(t_k) > 1 \quad (4)$$

در معادلات بالا s_k ضریب رطوبتی حوضه است که تابعی از تبخیر و تعرق در حوضه بوده و با معادلات ۲ و ۳ بیان می‌گردد. در معادله ۳، $\tau_w(t_k)$ مقدار شاخص s_k را در معادله ۲ در هنگامی که بارش رخ نمی‌دهد کنترل می‌کند که در آن: R برابر دمای مرجع، τ_w ثابت زمانی خشک شدن حوضه^۶ و f فاکتور تعدیل دما^۷ است. در معادله ۳ پارامتر C بگونه‌ای تعیین می‌شود که حجم بارندگی موثر و رواناب مشاهداتی در دوره واسنجی یکسان گردد. سپس بارندگی موثر توسط مدول خطی هیدروگراف (معادله ۴) به رواناب سطحی تبدیل خواهد شد. در معادله ۴ پارامترهای q و s پارامترهای مربوط به

4- Non- linear loss module

5- Linear unit hydrograph module

6- Catchment drying time constant

7- Temperature modulation factor

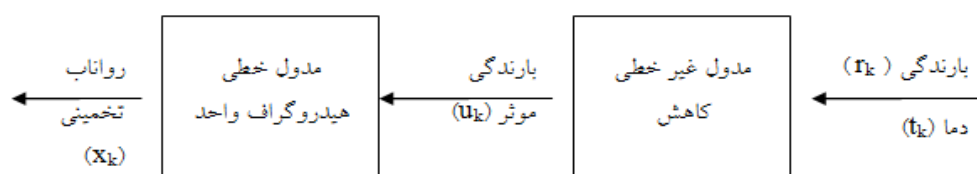
1- Intergovernmental panel of climate change

2- Special reports on emission scenario

3- Change factor

as, bq و bs از مدول خطی هیدروگراف (معادله ۴) می‌بایست بر اساس داده‌های مشاهداتی برای حوضه مورد مطالعه کالیبره شوند.

تفکیک هیدروگراف حوضه به دو قسمت هیدروگراف سریع (Q) و هیدروگراف کند (S) می‌باشند. بطور کلی در این روش سه پارامتر τ_w , f و C از مدول غیر خطی کاهش معادلات ۱ تا ۳ و سه پارامتر از چهار پارامتر a, q,



شکل ۱- فرآیند شبیه‌سازی بارش- رواناب همراه با مدول‌های خطی و غیر خطی در روش ارایه شده توسط جکمن و هورنبرگر

جدول ۲- مشخصات ۹ مدل چرخه عمومی اتمسفر-اقیانوس (AOGCM) مورد استفاده در تحقیق حاضر
(قابل دسترس در پایگاه اطلاعات IPCC(AR4))

نام مدل	گروه موسس	سناریوهای شبیه سازی	قدرت تفکیک	
			اقیانوسی	اتمسفری
CCSM3	NCAR (USA)	A2, B1	1.4° . 1.4°	0.46° . 1.125°
CGCM3	CCCMA (Canada)	A2, B1	3.75° . 3.75°	1.875° . 1.875°
CSIRO Mk3	ABM (Australia)	A2, B1	1.875° . 1.875°	0.95° . 1.875°
GFDL CM2.1	NOAA/GFDL (USA)	A1FI, A2, B1	2° . 2.5°	0.9° . 1.0°
GISS E-R	NASA/GISS (USA)	A2, B1	4° . 5°	4° . 5°
HadCM3	UKMO (UK)	A1FI, A2, B1	2.5° . 3.75°	1.25° . 1.25°
ECHAM5	MPI (Germany)	A2, B1	1.875° . 1.875°	1.0° . 1.0°
MIROC-med	CCSR (Japan)	A2, B1	2.81° . 2.81°	0.9° . 1.4°
PCM	NCAR (USA)	A1FI, A2, B1	2.81° . 2.81°	1.0° . 1.0°

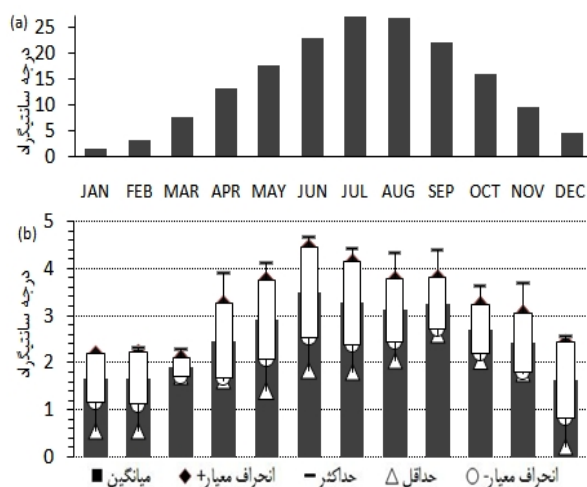
این پارامترها بوسیله معادلات مختلفی به یکدیگر مربوط می‌شوند و از طریق واسنجی بدست می‌آیند. شکل ۲ ساختار این مدل بارش- رواناب را نشان می‌دهد. داده‌های کوچک مقیاس شده حاصل از نه مدل AOGCM بطور جداگانه به هر کدام از دو مدل بارش - رواناب معرفی شده و دامنه تغییرات رواناب حوضه قره-سو در اثر تغییر اقلیم در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ شبیه سازی می‌شوند.

مدل بارش - رواناب SIMHYD

مدل SIMHYD یک مدل مفهومی^۱ بارش- رواناب است که جریان روزانه را با استفاده از داده‌های بارش و تاخیر تعرق پتانسیل روزانه شبیه سازی می‌کند. SIMHYD نسخه ساده شده‌ی مدل مفهومی بارش- رواناب HYDROLOG در سال ۱۹۷۲ و MODHYDROLOG در سال ۱۹۹۱ است (چیو، ۲۰۰۲). در مدل SIMHYD از هفت پارامتر استفاده می‌شود که شامل: ضریب جریان پایه، ضریب نفوذ، ضریب رواناب سطحی، کسر نفوذ، ظرفیت ذخیره قطع بارش، ضریب تغذیه و ظرفیت ذخیره رطوبت خاک می‌باشند.

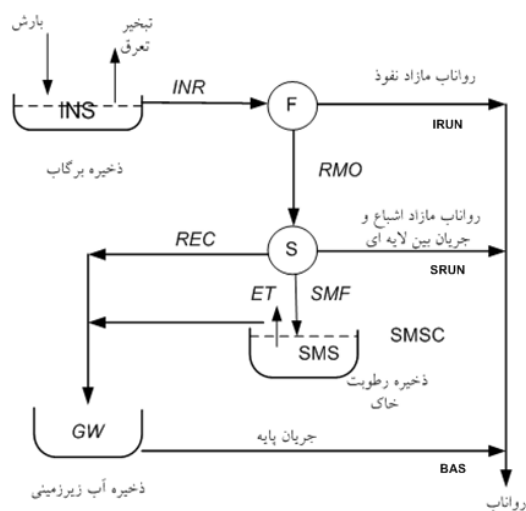
1- Conceptual model

میانگین، انحراف از معیار، حداکثر و حداقل تغییرات در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود متوسط دراز مدت ماهانه دمای منطقه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ در همه‌ی ماه‌ها افزایش می‌یابد. به طوری که متوسط بیشترین افزایش در ماه ژوئن $1/92^{\circ}\text{C}$ بوده و انحراف معیار مدل‌های AOGCM $1/92^{\circ}\text{C}$ است. این مقدار نشان از عدم قطعیت بالای نه مدل AOGCM در پیش‌بینی دما دارد. از طرف دیگر بیشترین افزایش دما مربوط به فصل تابستان (JJA) $0/85^{\circ}\text{C}$ است. این در حالیست که کمترین افزایش در فصل زمستان (DJF) $0/63^{\circ}\text{C} \pm 1/67$ رخ داده است. در فصول بهار و پاییز مقدار افزایش دما نزدیک بهم بوده که مقدار آن $0/6^{\circ}\text{C} \pm 2/5$ است. بنابراین نتایج انتظار می‌رود بازخورد بارزی در بیلان آبی منطقه بدلیل کاهش پوشش برف، افزایش تبخیر و افزایش روزهای خشک در تابستان بوجود آمده و همچنین پتانسیلی برای تغییر در وقایع جوی و هیدرولوژی حوضه‌ی قره‌سو بوجود آید.



شکل ۳- میانگین دمای ماهانه در دوره مشاهداتی ۲۰۰۰-۱۹۷۱ تغییرات دما در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ نسبت به دوره پایه

بارش نه تنها تأثیر مهمی در وضعیت اقلیمی منطقه دارد. بلکه می‌تواند بعنوان مهمترین عامل موثر بر رواناب منطقه قلمداد شود. شکل ۴ محدوده تغییرات بارش منطقه را در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل هرچند ۹ مدل AOGCM بیشترین درصد افزایش بارش را در فصل



شکل ۲- ساختار مدل SIMHYD در شبیه سازی روزانه بارش-رواناب

جهت مقایسه عملکرد دو مدل از معیارهای ضریب تعیین R^2 ، جذر میانگین مربعات خطا $(RMSE)$ و ضریب اریبی B استفاده شد. هرچه عدد R^2 به مقدار یک و اعداد $RMSE$ و B به مقدار صفر نزدیکتر باشند، دبی‌های شبیه سازی شده دقت مطلوب تری خواهند داشت.

نتایج و بحث

تغییر در دما و بارش جزء اولین اثرات تغییر اقلیم در یک منطقه است. سپس این تغییرات در شاخصهای هیدرولوژی و بیولوژی حوضه تأثیر گذار خواهد بود. در این قسمت در ابتدا به بررسی وضعیت دما و بارش مشاهداتی منطقه مورد مطالعه پرداخته سپس محدوده تغییرات دما و بارش منطقه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ تحت عدم قطعیت مدل‌های مختلف AOGCM مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان تأثیر محدوده تغییرات دما و بارش منطقه بر رواناب حوضه تحت عدم قطعیت مدل‌های بارش-رواناب در دوره‌ی آتی تعیین می‌شود.

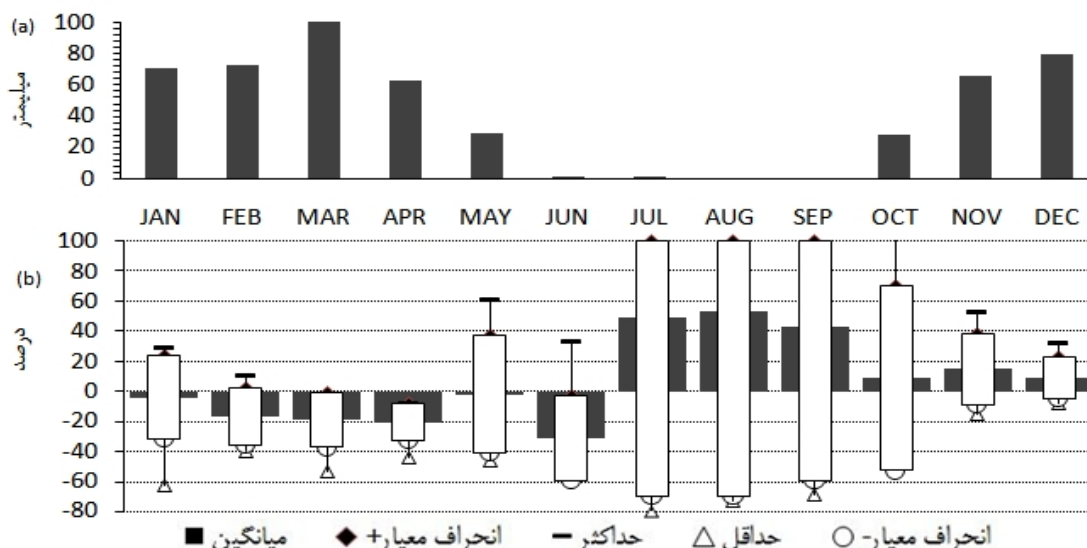
محدوده تغییرات دما و بارش

محدوده تغییرات دما و بارش منطقه در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ نسبت به دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) توسط

1- Coefficient of determination
2- Root mean square error (RMSE)
3- Bias

طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد که بارش متوسط در بهار و زمستان کاهش می‌یابد.

تابستان نشان می‌دهند ولی به علت کم بودن بارش در این فصل که نزدیک به صفر است، اثر چندانی در متوسط بارش بلند مدت این فصل نخواهد داشت. از



شکل ۴- میانگین بارش ماهانه در دوره مشاهداتی ۱۹۷۰-۲۰۰۰ (a) تغییرات بارش در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ نسبت به دوره پایه (b)

انتخاب شدند. این انتخاب در هر دو مدل بر اساس بالاترین ضریب تعیین (R^2) و پایین ترین شاخص‌های خطا (Bias, RMSE) بین رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده صورت گرفت.

در مدل IHACRES از آمار روزانه دما، بارش میانگین حوضه و رواناب مشاهداتی ایستگاه قره باغستان برای شبیه سازی استفاده شده است. دوره (۱۹۸۰/۱/۱) - (۱۹۸۵/۱/۱) برای واسنجی و دوره (۱۹۸۳/۱۲/۳۱) - (۱۹۸۸/۱۲/۳۱) برای صحت سنجی شبیه‌سازی انتخاب شدند. مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل IHACRES در جدول ۳ آمده است. شکل ۵ وضعیت عملکرد مدل IHACRES را نشان می‌دهد.

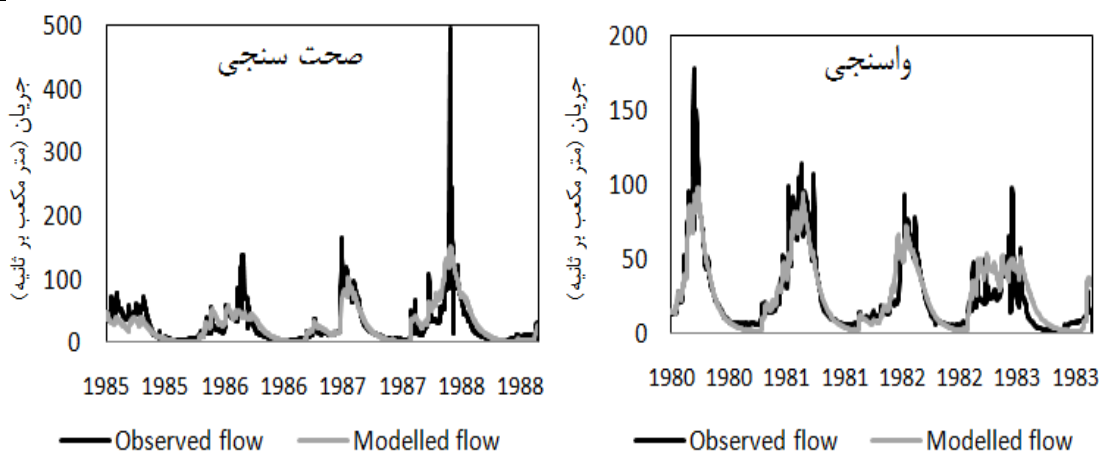
بیشترین درصد کاهش بارش در بهار با (20 ± 14) درصد و سپس در زمستان با کاهش (20 ± 3) درصد خواهد بود. بطور کلی افزایش بارش در فصل پاییز و به مقدار (8 ± 30) درصد و سپس روند کاهشی در زمستان و بهار و بدون تغییر در تابستان، نشان از دگرگونی توزیع بارش در منطقه دارد. که می‌تواند در ذخیره آبهای زیرزمینی، جریانهای بهاری، رواناب حوضه، خشکسالی-های دوره‌ای و وقایع حدی اثر گذار باشد.

شبیه‌سازی بارش- رواناب

در شبیه‌سازی بارش- رواناب روزانه‌ی حوضه قره‌سو برای هر دو مدل IHACRES و SIMHYD در دوره پایه (۱۹۷۰-۲۰۰۰)، بهترین دوره‌ی واسنجی و صحت سنجی برای به حداقل رساندن خطای شبیه‌سازی

جدول ۳- مقادیر پارامترهای واسنجی شده در مدل IHACRES

f	τw	aq	bq	as	bs	C
۱/۷	۱۰	-۱۹/۹	۱/۱	۰/۹۷	۱/۵	۰/۰۰۳



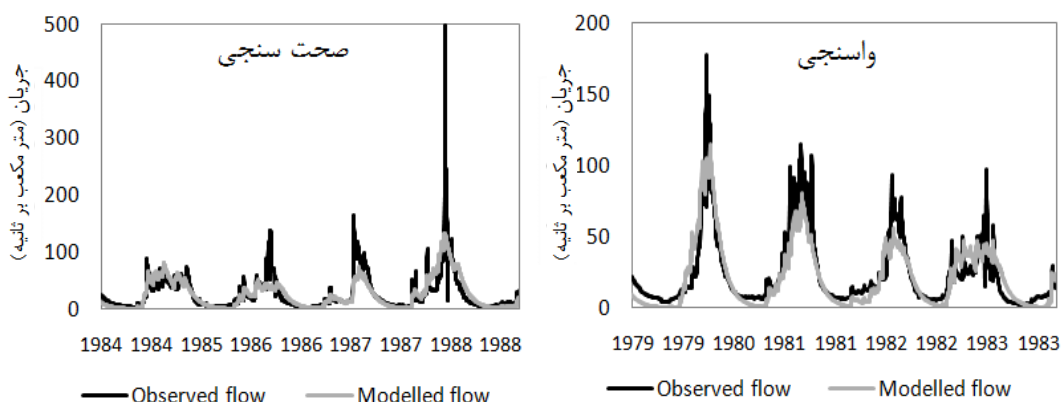
شکل ۵- سری زمانی رواناب مشاهداتی و مدل شده IHACRES در دوره واسنجی و صحت سنجی

بر اساس مقایسه‌ی شکل‌های ۵ و ۶ و معیارهای عملکرد در جدول ۵، هر دو مدل در دوره‌ی مشترک شبیه سازی، اختلاف چندانی نداشتند. هرچند مدل IHACRES با بالاترین ضریب تعیین و پایین ترین شاخص‌های خطا در دوره‌ی واسنجی و صحت سنجی، نتیجه‌ی مطلوب تری در شبیه سازی رواناب خواهد داشت.

این در حالی است که در مدل SIMHYD از آمار روزانه بارش میانگین حوضه، رواناب مشاهداتی ایستگاه قره باغستان و تبخیر تعرق پتانسیل بدست آمده از معادله هارگریوز- سامانی، برای شبیه سازی استفاده شده است. دوره (۱۹۷۹/۱/۱-۱۹۸۳/۱۲/۳۱) برای واسنجی و دوره (۱۹۸۴/۱/۱-۱۹۸۸/۱۲/۳۱) برای صحت سنجی شبیه سازی انتخاب شدند. مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل SIMHYD در جدول ۴ آورده شده است. شکل ۶ و جدول ۵ عملکرد مدل SIMHYD را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقادیر پارامترهای واسنجی شده در مدل SIMHYD

ظرفیت ذخیره رطوبت خاک	ضریب تغذیه	ظرفیت ذخیره قطع بارش	ضریب رواناب سطحی	ضریب نفوذ	ضریب جریان پایه	کسر نفوذ
۳۱۸/۵۲	۱	۰	۰/۰۰۲	۳۹۶	۰/۰۲۴	۰/۹۹



شکل ۶- سری زمانی رواناب مشاهداتی و مدل شده SIMHYD در دوره واسنجی و صحت سنجی

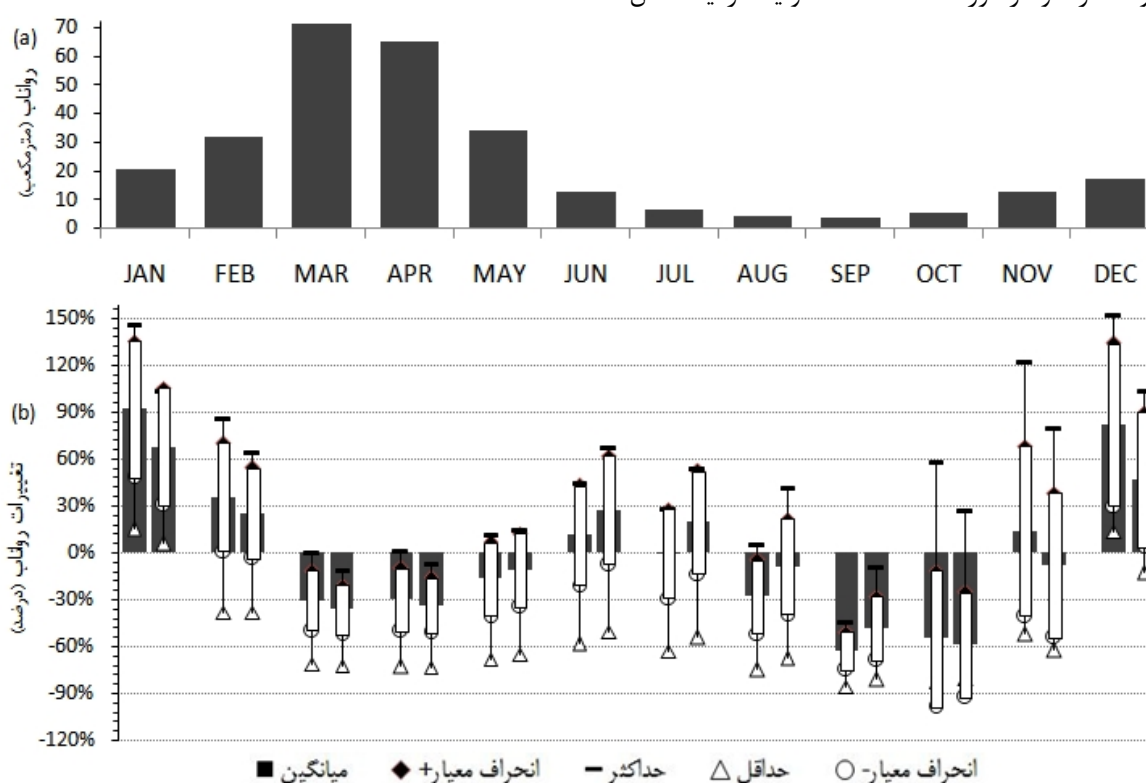
جدول ۵- مقایسه شاخص‌های عملکرد دو مدل هیدرولوژی در دو دوره شبیه سازی

Bias	RMSE	R ²	مدل	
-۰/۰۹	۰/۲۹	۰/۸۱	IHACRES	واسنجی
۱/۲۹	۰/۳۱	۰/۷۹	SIMHYD	۱۹۸۰-۱۹۸۳
۰/۸۷	۰/۵۴	۰/۶۶	IHACRES	صحت سنجی
۱/۸	۰/۵۷	۰/۶۲	SIMHYD	۱۹۸۵-۱۹۸۸

۷ تغییرات بلند مدت ماهانه رواناب در دوره‌ی آتی را نسبت به دوره‌ی مشاهداتی با چهار معیار میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل با مقایسه‌ی دو مدل بارش-رواناب IHACRES و SIMHYD نشان می‌دهد.

تلفیق عدم قطعیت مدل‌های AOGCM و مدل‌های هیدرولوژی

با معرفی سری‌های زمانی دما و بارش حاصل از ۹ مدل AOGCM به مدل‌های هیدرولوژی، سری زمانی رواناب حوضه قره‌سو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ تولید گردید. شکل



شکل ۷- متوسط رواناب در دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ (a) مقایسه درصد تغییرات میانگین بلند مدت رواناب شبیه سازی شده تحت خروجی مدل AOGCM-A2 با استفاده از دو مدل بارش-رواناب IHACRES و SIMHYD در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ (b)

فصل زمستان با (44 ± 70) درصد و مقدار (10 ± 38) متر مکعب است. این در حالیست که فصول دیگر با کاهش یا بدون تغییر در رواناب مواجه هستند. به طوری که بیشترین کاهش در فصل پاییز با (36 ± 34) درصد و مقدار $(3/3 \pm 6)$ متر مکعب و سپس در بهار

با نگاهی به این شکل مشخص می‌شود که در هر دو مدل، روند تغییرات مشابه است ولی مقدار و دامنه‌ی این تغییرات متفاوت است. در شبیه سازی مدل IHACRES که دامنه‌ی تغییرات زیادتری در اکثر ماه‌ها از خود نشان می‌دهد، بیشترین درصد افزایش در رواناب مربوط به

تأثیر عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژی بر رواناب حوضه بیشتر می‌باشد. این امر از مقایسه محدوده تغییرات دما و بارش منطقه نسبت به تغییرات رواناب حاصل از دو مدل هیدرولوژی بکار گرفته شده بخوبی قابل استنتاج می‌باشد. بنابراین می‌توان مدل‌های AOGCM را بعنوان بزرگترین منبع عدم قطعیت در مطالعات اثر تغییر اقلیم بر رواناب قلمداد کرده و در مطالعات آتی سعی در مدیریت بیشتر این منبع عدم قطعیت کرد. لازم به ذکر است که در این تحقیق عدم قطعیت مربوط به روش‌های کوچک مقیاس کردن لحاظ نشده است و بررسی آن نیازمند مجال بیشتری است.

سپاس‌گزاری

این پژوهش با حمایت شرکت مدیریت منابع آب ایران با کد WRE-۸۸۰۱۰ به انجام رسیده است که لازم است از آن شرکت تشکر و قدردانی شود.

منابع

- 1- Boorman D.B. Sefton C.E. 1997. Recognizing the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response. *Climatic Change* 35: 415-434.
- 2- Chiew F.H.S. Peel M.C. and Western A.W. 2002. Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD. In: *Mathematical Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publication, Littleton, Colorado.
- 3- Christensen N. and Lettenmaier D. P. 2006. A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *J. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss* 3: 3727-3770.
- 4- Hayhoe K. Wake C.P. Huntington T.G. Luo L. Schwartz M.D. Sheffield J. Wood E. Anderson B. Bradbury J. DeGaetano A. Troy T.J. Wolfe D. 2007. Past and future changes in climate and hydrological indicators in the US Northeast, *J. Clim Dyn* 28:381-407.
- 5- Tignor M. and Miller H.L. 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental*.
- 6- Jakeman A.J. and Hornberger G.M. 1993. How much complexity Is warranted in a rainfall-runoff model? *Water resources research* 29(8): 2637-2649.

کاهش (21 ± 25) درصد با مقدار (11 ± 43) متر مکعب خواهد بود. در مدل شبیه سازی SIMHYD روند افزایش و کاهش رواناب در فصول سال مشابه مدل IHACREC است. با این تفاوت که درصد افزایش رواناب در زمستان (37 ± 47) درصد و درصد کاهش رواناب پاییز (33 ± 39) می‌باشد. همان طور که ملاحظه می‌شود رواناب حوضه‌ی قره‌سو که توسط خروجی‌های ۹ مدل AOGCM تحت سناریوی انتشار A^2 شبیه سازی شده است، از عدم قطعیت بالایی برخوردار است. بطوریکه در مدل IHACRES ماه نوامبر بیشترین دامنه‌ی تغییرات را با $54 \pm$ درصد و ماه سپتامبر با $12 \pm$ درصد کمترین دامنه‌ی تغییرات رواناب را دارند. همچنین در بین فصول، زمستان با $44 \pm$ درصد و بهار با $21 \pm$ درصد بترتیب بیشترین و کمترین دامنه‌ی تغییرات را خواهند داشت. این مقادیر برای مدل SIMHYD در زمستان و بهار بترتیب $36 \pm$ و $19 \pm$ درصد خواهد بود.

نتیجه گیری

نتایج ۱۸ سناریوی اقلیمی و ۱۸ سری زمانی رواناب شبیه‌سازی شده توسط دو مدل بارش-رواناب، نشان از تغییرات اقلیمی و هیدرولوژی حوضه‌ی قره‌سو در دوره آتی دارد. مقایسه‌ی پارامترهای اقلیمی مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط مدل‌های AR4-A2 در دوره‌ی ۲۰۶۹-۲۰۴۰ نشان می‌دهد دمای منطقه در ماه‌های مختلف بین ۱/۸ تا ۳/۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه گرمتر می‌شود. بارش نیز بجز در ماه‌های بدون بارش، تغییری بین ۳۰- تا ۲۳ درصد خواهد داشت. که بر مقدار کلی آب قابل دسترس، سطح دریاچه‌ها، زمان پیک و وقایع حدی اثر گذار است. از آنجایی که دما و بارش بیشترین تأثیر را بر تغییرات هیدرولوژی حوضه دارند، شبیه‌سازی‌ها نشان از تغییر رواناب بین ۱۶ تا ۳۰ متر مکعب در حوضه دارد. این امر در نهایت منجر به جابجایی زمان و مقدار پیک سیلاب، تغییر در سطح دریاچه‌ی سد و مدیریت کنترل سیلاب، افزایش زمان خشکسالی‌ها و به خطر افتادن مزارع زیر کشت می‌شود. بطور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که تأثیر عدم قطعیت مدل‌های AOGCM بر اقلیم منطقه نسبت به

- models over the Murray-Darling Basin using simulated maximum temperature, minimum temperature and precipitation. *Climatol* 28: 1097–1112.
- 13- Mitchell T.D. 2003. Pattern scaling: an examination of accuracy of the technique for describing future climates. *Climatic Change* 60: 217-242.
- 14- Purkey D.R. Joyce B. Vicuna S. Hanemann M.W. Dale L.L. Yates D. and Dracup J. A. 2007. Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley. *Climatic Change* 87 (Suppl 1):S109–S122.
- 15- Wang H. and Lau K.M. 2006. Atmospheric hydrological cycle in the tropics in twentieth century coupled climate simulations. *Int. J. Climatol*. 26: 655–678.
- 16- Wilby R.L. and Harris I. 2006. A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*. 42, W02419, Doi:10.1029/2005WR004065.
- 7- Jason P. E. 2008. 21st century climate change in the middle east, *Climatic Change* DOI 10.1007/s10584-008-9438-5.
- 8- Jiang T. Chen Y.D. Chong-yu Xu. Xiaohong Chen. Xi Chen. And Vijay P. 2007. Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China, *Journal of Hydrology* 336: 316–333.
- 9- Jones P.D. and Hulme M. 1996. Calculating regional climatic times series for tempreture and precipitation: methods and illustrations. *International journal of climatology* 16: 361-377.
- 10- Lane M.E. Kirshen P.H. and Vogel R.M. 1999. Indicators of impact of global climate change on U.S. water resources. *ASCE, Journal of Water Resource Planning and Management* 125(4): 194-204.
- 11- Maurer E. P. 2007. Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenario. *Climatic Change* 82:309–325
- 12- Maxino C.C. McAvaney B.J. Pitman A.J. and Perkins S.E. 2007. Ranking the AR4 climate

